

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN COMBINADA DE 4-PUNTAS

**Francisco Javier Arizaga Ayala**

Universidad de Sonora  
*farizagaayala@gmail.com*

**Arturo III Espinoza Duarte**

Universidad de Sonora  
*arturoiii@gmail.com*

**José Antonio Gallardo Cubedo**

Universidad de Sonora  
*a\_n\_t\_1212@hotmail.com*

**Armando Gregorio Rojas Hernández**

Universidad de Sonora  
*arojas@cifus.uson.mx*

## Resumen

Se ha desarrollado un sistema con diseño automatizado por medio de software para la medición de resistividad de materiales, en este caso semiconductores, por medio de la técnica de 4 puntas. El método Rymaszewski es utilizado para eliminar la dependencia geométrica de las muestras y sólo configurar la posición de las puntas conforme al método. Los resultados de resistividad obtenidos para las muestras CdS, PbS y ZnO son  $11.8 \times 10^6$ ,  $7.7 \times 10^6$  y  $5.3 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ , respectivamente. Las películas han sido crecidas por síntesis y con grosores diferentes lo cual resultará en pequeñas diferencias entre los resultados obtenidos y los resultados en la literatura: la síntesis del CdS y PbS ha sido por el método de depósito en baño químico (CBD, por sus siglas en inglés) y el ZnO por el método de depósito de capas atómicas (ALD, por sus siglas en inglés).

**Palabras Claves:** Cuatro puntas, Método Rymaszewski, resistividad, semiconductor.

## **Abstract**

*A software-automated system has been developed to measure the materials resistivity, in this case semiconductors, by the four point-probe technique. We neglected the sample geometry by using the Rymaszewski method but positioned the probes carefully according to the method. The resistivity results obtained for the samples CdS, PbS and ZnO are:  $11.8 \times 10^6$ ,  $7.7 \times 10^6$  &  $5.3 \times 10^6$   $\Omega \cdot \text{cm}$ , respectively. The thin films have been grown by different synthesis and thickness that means that the resistivity results will show some differences between the results obtained and the results in the literature: The CdS y PbS samples was grown by Chemical bath deposition (CBD) method and the ZnO sample was grown by Atomic Layer Deposition (ALD) method.*

**Keywords:** *Four point-probe, Rymaszewski method, resistivity, semiconductor.*

## **1. Introducción**

El avance de dispositivos a base de película delgada como transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET, por sus siglas en inglés), algunos otros basados en tecnología de integración a gran escala (VLSI, por sus siglas en inglés) ha impulsado el desarrollo y mejoramiento de los métodos de medición de parámetros de semiconductores, tal como la técnica de 4-puntas, método utilizado en la manufactura de materiales semiconductores, implementándose en procesos de caracterización [Dieter, 2006].

La medición de resistividad de materiales semiconductores se puede realizar con la técnica de 4-puntas [Haibin, 2010], [Rymaszewski, 1969]. El método de 4-puntas depende de aspectos como la geometría de la muestra, la posición de las puntas y la separación de puntas entre ellas. Estas condiciones afectan la calidad de la medición en la muestra, dónde el parámetro de factor de corrección se ve influenciado. Sin embargo, se tienen modificaciones en la técnica que garantizan la independencia de algunos de estos factores como la geometría de la muestra. Se recurre al método de Rymaszewski [Haibin, 2010], [Rymaszewski, 1969] que implementa una combinación de mediciones, modificando la inyección de la corriente con la medición del voltaje entre las puntas.

Las resistencias de contacto pueden ser un problema serio cuando se hace contacto eléctrico utilizando los micros manipuladores puesto que el área de contacto es muy pequeña. Rymaszewski describe un método experimental de calibración lineal de un micro-arreglo de distribución de electrodos (cuatro puntas) [Rymaszewski, 1969], ver la figura 1:

- a) Las puntas están en contacto en un arreglo de línea recta en la muestra.
- b) Las puntas están distribuidas arbitrariamente a lo largo de la línea perpendicular al límite no conductor en el medio plano.
- c) Las puntas están distribuidas a lo largo del límite no conductor del medio plano.

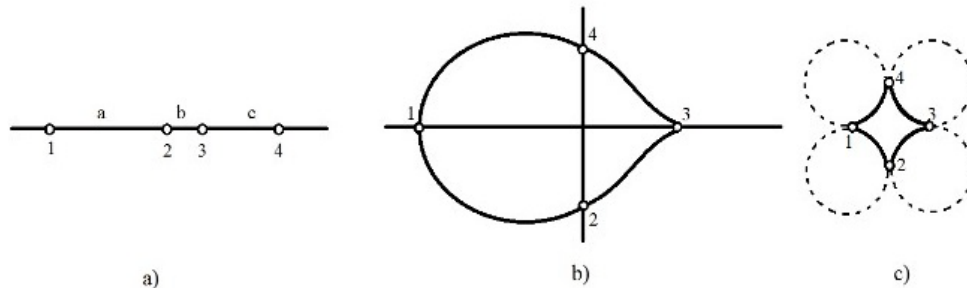


Figura 1 Posición de puntas para diferentes arreglos en el método Rymaszewski.

En este trabajo, se lleva a cabo el método de Rymaszewski mediante el diseño de un sistema de medición utilizando un Keithley 2400 SourceMeter, controlado a través de instrumentación virtual con el software LabVIEW y una tarjeta DAQ NI 6009 como dispositivo de interfaz y circuitería externa para la conmutación de las puntas haciendo uso del circuito integrado CD4052.

## 2. Métodos

### Principio de Funcionamiento

La resistividad puede afectar la resistencia serie de un dispositivo, voltaje de umbral, capacitancia y otros parámetros [Keithley, 2017]. La resistividad se puede representar con ecuación 1.

$$\rho = R_s \cdot \delta \cdot F \quad (1)$$

Donde  $R_s$  es la resistencia de hoja,  $\delta$  es el grosor de la muestra y  $F$  es el factor de corrección para el grosor. Para  $R_s$  se tiene:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \left( \frac{V_1 + V_2}{I} \right) \cdot f\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (2)$$

Donde  $f(V_2/V_1)$  es la función de Van der Pauw, que es una función implícita.

El diseño propuesto del sistema de medición de resistencia de hoja  $R_s$  y resistividad  $\rho$  consiste del método de cuatro puntas haciendo uso, a la vez, del método de Rymaszewski que consiste de dos medidas: para la primera medida, la corriente  $I$  pasa por la punta 1 y sale por la punta 4, el voltaje  $V_1$  se toma de las puntas 2 y 3. Posteriormente se toma una segunda medida donde la corriente  $I$  pasa por las puntas 1 y 2 y el voltaje  $V_2$  es medido entre las puntas 3 y 4, como se muestra en la figura 2.

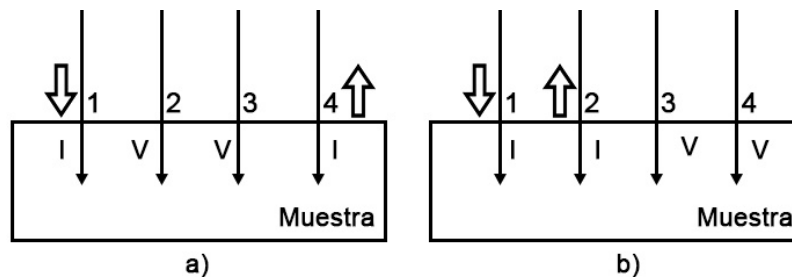


Figura 2 Arreglo de las puntas para el sistema de medición de resistividad de 4-puntas.

### 3. Resultados

#### Trabajo Experimental

El sistema desarrollado tiene como objetivo medir la resistividad de distintas muestras en función de la corriente. Se realizan mediciones de películas delgadas de sulfuro de cadmio (CdS), sulfuro de plomo (PbS) y óxido de zinc (ZnO) mediante una configuración de arreglo lineal en la posición de las puntas como se observa en la figura 2.

En la figura 3 se tiene un esquema del sistema que se compone de una PC con LabVIEW 2015 Windows 2010 como software controlador para el Keithley 2400. Como comandos de control se utiliza el diagrama de la figura 5. En el sistema,

originalmente se tiene una configuración para mediciones I-V, compuesto de dos puntas, por lo que se recurre a construir dos estructuras para soporte de las dos puntas restantes. Mediante el uso de un centro de maquinado CNC se fabricaron dos estructuras de aluminio 6061 para estación de prueba “Probing Solution Inc.” modelo EMZ-5TR. Las dimensiones de la estructura son 38.1 milímetros por 38.1 milímetros de base por 115.824 milímetros de largo, cuenta con una cavidad de 115.824 milímetros por 48.006 milímetros y una profundidad de 20.32 milímetros de profundidad. Estas medidas se tomaron con respecto a la altura de la mesa de la estación de pruebas. En la figura 4a se observa el diseño de la estructura fabricada en el centro de maquinado CNC, y en la figura 4b se muestra cómo se adapta la estructura al mecanismo de posicionamiento de la punta de la estación.

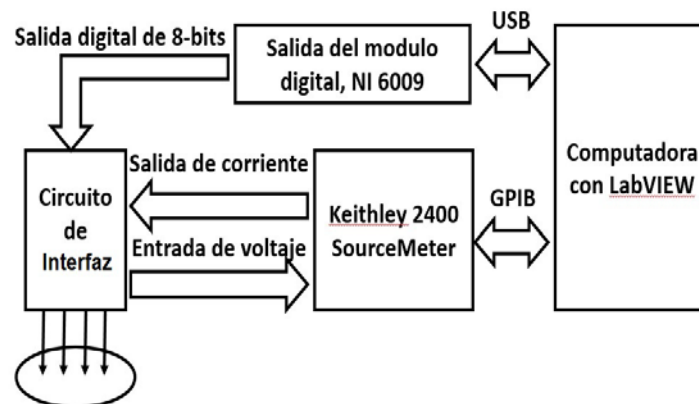


Figura 3 Esquema del sistema de medición combinada de 4-puntas.

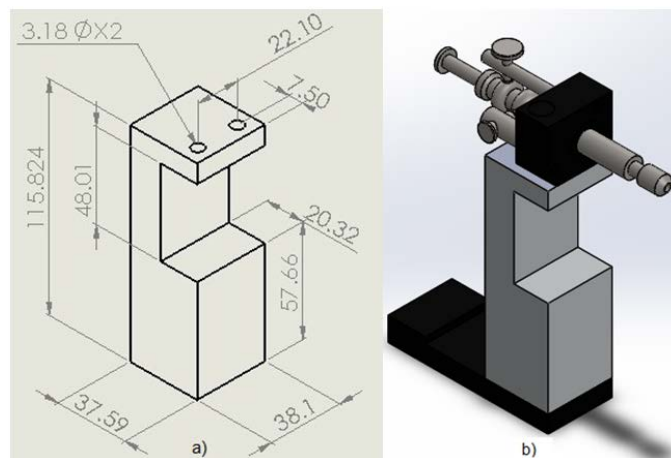


Figura 4 Estructura fabricada para soporte de puntas de medición, estructura ensamblada con el mecanismo de posicionamiento de la punta.

El modelo 2400 de Keithley es un sistema diseñado para poder excitar mediante corriente o voltaje a un dispositivo bajo prueba y posteriormente poder medir su respuesta en corriente o voltaje de manera automatizada mediante algún dispositivo controlador en este caso una PC, por lo cual usaremos en adelante esta definición como (fuente-medidor).

Para el diseño de un sistema fuente-medidor de corriente-voltaje utilizando Keithley 2400 se recurre al manual del mismo equipo para conocer los comandos y su funcionamiento. Los comandos necesarios para el uso del Keithley 2400 para ser utilizado como fuente-medidor observan en la tabla 1.

Tabla 1 Comandos de programación de Keithley 2400.

N°	Acción	Comandos	Comentarios
1	Selección de medidor; función de fuente	:SOUR:FUNC CURR  :SOUR:CURR:MODE:FIXED	Función fuente de corriente  Configura modo fuente corriente
2	Selección de fuente y compliancia	:SENS:FUNC "VOLT"  :SOUR:CURR:RANG MIN :SOUR:CURR:LEV 0	Medición de voltaje  Rango mínimo de fuente
3	Selección de medición de rango de voltaje	:SENS:VOLT:PROT 25  :SENS:VOLT:RANG 20  :FORM:ELEM:VOLT	Nivel de fuente Selección de compliancia 25V Rango de voltaje 20V  Lectura solo de voltaje
4	Encender salida	:OUTP ON	Salida encendida antes de medir
5	Leer datos	:READ?	Disparo, obtención de lectura
6	Apagar salida	:OUTP OFF	Salida apagada después de medir

Para realizar correctamente el método Rymaszewski, se adapta un código para automatizar la medición para una primera configuración como se menciona en el apartado *Principio de funcionamiento*. El circuito multiplexa las puntas para que ahora la corriente entre por 1 y salga por 2, mientras la medición de voltaje se realiza entre 3 y 4. La función de multiplexar las puntas con la que cuenta el

circuito integrado CD4052 se realiza mediante la tarjeta de National Instruments modelo 6009, en la cual se envían 6 señales digitales codificadas para cada una de las configuraciones. Se crea un código que realiza la función de incrementos iguales de corriente, desde un punto inicial a un punto final especificados, leyendo en cada uno de ellos el voltaje medido para cada muestra. Posteriormente, los resultados son procesados como se indica en la ecuación 1 y ecuación 2, figura 5.

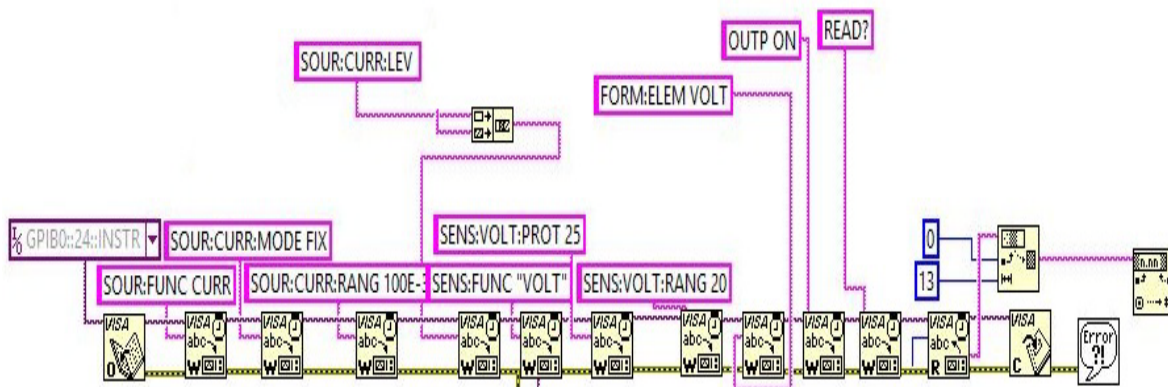


Figura 5 Código de LabVIEW, código en lenguaje para realizar un fuente-medidor.

En la figura 6 se tiene una representación del panel de control de LabVIEW. En él se especifican las condiciones para la inyección de corriente en la muestra para medir el voltaje y obtener curvas I-V y posteriormente obtener la resistividad del material.

La figura 7 muestra los resultados de resistividad para CdS, PbS y ZnO.

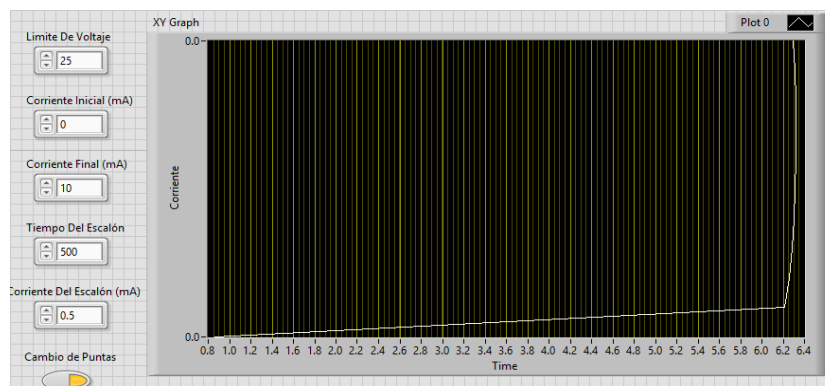


Figura 6 Panel de control LabVIEW con especificaciones voltaje y corriente para sistema

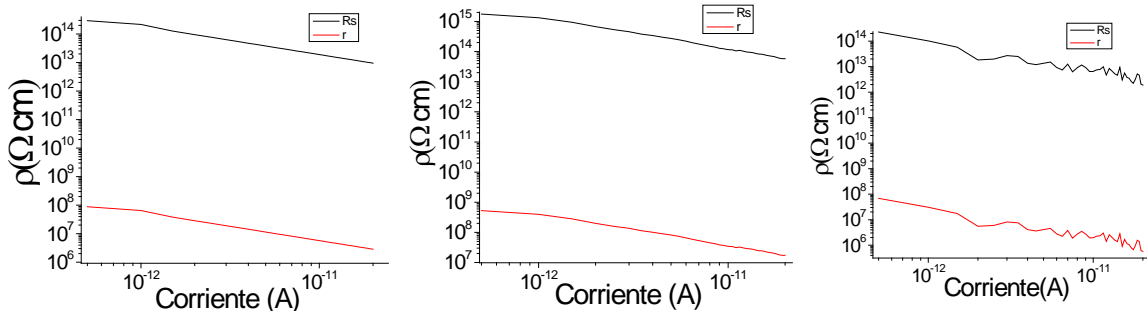


Figura 7 Comparación de resultados de resistividad ( $\rho$ ) muestras: CdS, PbS y ZnO.

#### 4. Discusión

Tres diferentes muestras se someten a medición en el sistema propuesto. La tabla 2 muestra la información obtenida de las tres muestras medidas y la tabla 3 resultados de diferentes autores que usaron diferentes síntesis y grosores para los mismos materiales. Se realiza un barrido de corriente de 0 a 20 pA, obteniendo los diferentes voltajes para cada muestra, implementando estos resultados para calcular la resistividad a partir de la ecuación 1 y ecuación 2. Se observa que los comportamientos de las mediciones de resistividad de las tres muestras presentan leves fluctuaciones y cambios poco representativos en comparación, así como también se tienen rangos de medición en el orden de  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$  con el sistema aquí desarrollado, \*Chemical Spray Pyrolysis (CSP).

Tabla 2 Información de las muestras de películas delgada de CdS, PbS y ZnO.

Muestras propias			
Muestra	Síntesis	Grosor (nm)	Resistividad promedio ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
CdS	CBD	300	$11.8 \times 10^6$
PbS	CBD	300	$7.7 \times 10^6$
ZnO	ALD	50	$5.3 \times 10^6$

Tabla 3 Muestras de película delgada de CdS, PbS y ZnO encontradas en la literatura.

Otros autores		
Síntesis	Grosor	Resistividad promedio ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
CSP*	---	Rango de $10^3$ y $10^5$ [Santiago, 2008]
CSP	300nm	$1.1 \times 10^3$ [Ghaffar, 2015]
PEALD	23nm	$5.9 \times 10^3$ [Jian, 2013]



## 5. Conclusiones

Se desarrolló un sistema automatizado de la técnica de 4 puntas (Four-Point Probe) por medio de software para hacer medidas de resistividad en semiconductores. En conjunto con la técnica de cuatro puntas se usa el método de Rymaszewski para eliminar dependencias geométricas de las muestras y sólo tomar en cuenta el posicionamiento de las puntas. El valor del factor de corrección  $F$  de la ecuación 1 está relacionado con la tasa entre el grosor de la película y el espaciamiento entre las puntas. Cuando la tasa es menos que 0.6 entonces  $F=1$ . Por facilidad de cálculos y métricas se toma el factor de corrección  $F$  igual a 1. Los resultados obtenidos de resistividad de las mediciones son  $11.8 \times 10^6$ ,  $7.7 \times 10^6$  y  $5.3 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ .

Se observa que en promedio la resistividad de la muestra de ZnO es menor en comparación a las otras muestras, esto es debido a que el grosor es un factor clave en la ecuación 1, esperando entonces mayor resistividad en películas gruesas.

Se comparan los resultados obtenidos con resultados de diferentes trabajos los cuales muestran relativa diferencia debido a las diferentes técnicas de síntesis de películas delgadas usadas y distintos grosores. Sin embargo, el comportamiento de resistividad es similar en todos los casos.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Ghaffar Faraj M., Effect of Thickness on the Structural and Electrical Properties of Spray Pyrolysed Lead Sulfide Thin Films. American Journal of Condensed Matter Physics, 2015.
- [2] Haibin Pan, Jianning Ding, et.al., Design of thin film resistivity measurements system based on virtual instrumentation technology. Journal of Jiangsu University, Natural science edition, 2010.
- [3] Haibin Pan, Boquan Li, et.al., Design, Implementation, and Assessment of a High-precision and Automation Measurement System for Thin Film Resistivity. Department of Measurement and Control Technology, 2010.

- [4] Dieter K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization*. Wiley IEEE Press, 2006.
- [5] Jian Zhang, Hui Yang, Qi-long Zhang, Shurong Dong, J.K. Luo, *Structural, optical, electrical and resistive switching properties of ZnO thin films deposited by thermal and plasma-enhanced atomic layer deposition*. ELSIEVER, 2013.
- [6] Rymaszewski R., Relationship between the correction factor of the four-point probe value and the selection of potential and current electrodes. *Journal of Scientific Instruments*, Vol. 2, 1969.
- [7] Santiago Tepantlán C., Structural, optical and electrical properties of CdS thin films obtained by spray pyrolysis. *Revista Mexicana de física*, Vol. 2, 2008.
- [8] Measuring the Resistivity and Determining the Conductivity Type of Semiconductor Materials Using a Four-Point Collinear Probe and the Model 6221 DC and AC Current Source: [www.keithley.com](http://www.keithley.com).